

VTT Technical Research Centre of Finland

## Varastokasassa olevan energiapuun kosteuden muutoksen mallintaminen

Heiskanen, Veli-Pekka; Raitila, Jyrki; Hillebrand, Kari

Published: 10/01/2014

*Document Version*  
Publisher's final version

[Link to publication](#)

*Please cite the original version:*

Heiskanen, V-P., Raitila, J., & Hillebrand, K. (2014). *Varastokasassa olevan energiapuun kosteuden muutoksen mallintaminen*. VTT Technical Research Centre of Finland. VTT Tutkimusraportti No. VTT-R-08637-13



VTT  
<http://www.vtt.fi>  
P.O. box 1000FI-02044 VTT  
Finland

By using VTT's Research Information Portal you are bound by the following Terms & Conditions.

I have read and I understand the following statement:

This document is protected by copyright and other intellectual property rights, and duplication or sale of all or part of any of this document is not permitted, except duplication for research use or educational purposes in electronic or print form. You must obtain permission for any other use. Electronic or print copies may not be offered for sale.



# Varastokasassa olevan energiapuun kosteuden muutoksen mallintaminen

Kirjoittajat: Veli-Pekka Heiskanen, Jyrki Raitila ja Kari Hillebrand

Luottamuksellisuus: Julkinen

<b>Raportin nimi</b>		
Varastokasassa olevan energiapuun kosteuden muutoksen mallintaminen		
<b>Asiakkaan nimi, yhteyshenkilö ja yhteystiedot</b>		<b>Asiakkaan viite</b>
Keski-Suomen liitto Pirjo Peräaho Sepänkatu 4, 40100 Jyväskylä		
<b>Projektin nimi</b>		<b>Projektin numero/lyhytnimi</b>
Metsäpolttoaineiden käytettävyyden parantaminen		75785/BIOVARMA
<b>Raportin laatija(t)</b>		<b>Sivujen/liitesivujen lukumäärä</b>
Heiskanen, V-P., Raitila, J. ja Hillebrand, K.		26/1
<b>Avainsanat</b>		<b>Raportin numero</b>
Energiapuu, metsähake, kosteus, mallinnus, varastot		VTT-R-08637-13
<b>Tiivistelmä</b>		
<p>Tutkimusraportti on ”Metsäpolttoaineiden käytettävyyden parantaminen” –projektin (Biovarma) osaraportti. Projektin päätavoitteena oli lisätä metsäpolttoaineiden käyttöä energian tuotannossa. Tämä saadaan aikaan parantamalla metsäpolttoaineiden laatua, laadunhallintaa ja toimituslogistiikkaa, parantamalla metsäpolttoaineiden käytettävyyttä lämpö- ja voimalaitoksissa ja osuutta polttoaineseoksissa sekä alentamalla tuotanto- ja käyttöketjun kustannuksia.</p> <p>Kyseessä olevassa tutkimustehtävässä luotiin malli, jonka avulla voidaan laskea energiapuun kosteuden muutos varastokasassa varastoinnin eri aikoina. Mallissa otetaan huomioon ensisijaisesti varastoalueen sadanta, haihdunta ja energiapuuvaraston alkukosteus. Lisäksi arvioidaan lumen sulamisen, kasan peittämisen ja varastopaikan sijainnin vaikutusta kasan kosteuden muuttumiseen.</p> <p>Mallilla tehtävää laskentaa voivat hyödyntää polttoaineen tuottajat ja energialaitokset arvioidessaan, mikä on eri kasojen kosteus silloin, kun niitä haluttaisiin käyttää. Laadittua mallia on mahdollista sovittaa ja soveltaa käyttöön energiapuun hankinnan informaatiojärjestelmässä. Malli auttaa optimoimaan toimituslogistiikkaa yhdistämällä hakkeen laadun (kosteuden) laskenta keskenään kommunikoivien toimitusohjausjärjestelmän ja voimalaitoksen polttoaineen laadunhallintajärjestelmien kanssa. Käytännöllisintä olisi liittää se osaksi energialaitoksen tai polttoaineen tuottajan energiapuun hankinta- ja varastoseurantajärjestelmää.</p>		
<b>Luottamuksellisuus</b>	Julkinen	
Jyväskylä 10.1.2014		
<b>Laatija</b>	<b>Tarkastaja</b>	<b>Hyväksyjä</b>
Veli-Pekka Heiskanen Johtava tutkija	Martti Flykman, Erikoistutkija	Jouni Hämäläinen, Teknologiapäällikkö
<b>VTT:n yhteystiedot</b>		
VTT, (Koivurannantie 1), PL 1603, 40101 Jyväskylä		
<b>Jakelu (asiakkaat ja VTT)</b>		
Keski-Suomen Liitto ja ohjausryhmän jäsenet		
<p><i>VTT:n nimen käyttäminen mainonnassa tai tämän raportin osittainen julkaiseminen on sallittu vain VTT:ltä saadun kirjallisen luvan perusteella.</i></p>		

## Alkusanat

---

Tutkimusraportti on ”Metsäpolttoaineiden käytettävyyden parantaminen” –projektin (Biovarma) osaraportti. Projektin päätavoitteena on lisätä metsäpolttoaineiden käyttöä energian tuotannossa. Tämä saadaan aikaan parantamalla niiden laatua, laadunhallintaa, toimituslogistiikkaa, käytettävyyttä lämpö- ja voimalaitoksissa ja osuutta polttoaineseoksissa sekä alentamalla tuotanto- ja käyttöketjun kustannuksia. Projekti toteutettiin Keski-Suomen Bioenergiasta elinvoimaa –klusteriohjelmassa vuosina 2011 - 2013. Projektia rahoittavat Keski-Suomen liitto EAKR-rahoituksella, Vapo Oy, Protacon Oy, Metsähallitus ja VTT.

Kyseessä olevan tutkimustehtävän tavoitteena oli luoda malli, jonka avulla voidaan arvioida energiapuun ominaisuuksien, lähinnä kosteuden, muutos varastokasassa. Mallissa otetaan huomioon ensisijaisesti varastoalueen sadanta, haihdunta ja energiapuumaan alkukosteus. Lisäksi arvioidaan lumen sulamisen, kasan peittämisen ja varastopaikan sijainnin vaikutusta kasan kosteuden muuttumiseen.

Projektin ohjausryhmään kuuluvat Jaakko Lehtovaara (pj., Vapo Oy), Jari Kymäläinen (Vapo Oy), Heikki Hämäläinen (Protacon Oy), Paavo Soikkeli (Metsähallitus) ja Jyrki Raitila (VTT). Päärahoittajan yhdyshenkilönä on toiminut ohjelmapäällikkö Pirjo Peräaho Keski-Suomen liitosta. Ohjausryhmän sihteerinä on toiminut projektin päällikkö Ari Erkkilä (VTT) kesäkuun 2013 loppuun saakka ja elokuusta 2013 lähtien Martti Flyktman (VTT).

Osaraportin laatimiseen ovat osallistuneet Veli-Pekka Heiskanen, Kari Hillebrand, Jyrki Raitila ja Martti Flyktman VTT:stä.

Kiitämme ohjausryhmää hyödyllisistä neuvoista ja kommenteista työn aikana sekä Metsähallitusta ja Vapo Oy:tä käytännön avusta projektin kenttätöiden aikana.

Jyväskylä 10.1.2014

Tekijät

## Sisällysluettelo

---

Alkusanat .....	2
Sisällysluettelo.....	3
1. Johdanto.....	4
2. Tavoite.....	4
3. Tehtävän kuvaus.....	5
3.1 Varastofunktioiden rakenteen määrittäminen .....	5
3.2 Varastofunktioiden mallintaminen .....	5
3.3 Mallien oikeellisuuden toteaminen .....	6
3.4 Hyödyntäminen informaatiojärjestelmässä.....	6
4. Menetelmät.....	6
4.1 Puutavaralajien varastoseuranta.....	6
4.2 Sään havainnointi .....	7
4.3 Varastokasan kosteuden muutoksen laskentamalli.....	8
5. Tulokset .....	11
5.1 Vuoden 2012 sääolot.....	11
5.2 Puutavaralajien kuivuminen vuoden 2012 sääoloissa .....	13
5.3 Varaston sijaintipaikan ja peittämisen vaikutus kuivumiseen.....	15
5.4 Puun kuiva-ainehäviöt varastoinnin aikana .....	16
5.5 Esimerkkejä varastokasan kuivumisen laskennasta.....	16
5.5.1 Kuivuminen pitkän aikavälin keskimääräisissä sääolosuhteissa.....	16
5.5.2 Kasan peittämisen vaikutus .....	17
5.5.3 Kesän sääolosuhteiden vaikutus kuivumiseen .....	18
5.5.4 Lumen sulamisen vaikutus.....	19
5.5.5 Laskenta- ja mittaustulosten vertailu .....	20
6. Johtopäätökset .....	24
Lähdeviitteet.....	26

## 1. Johdanto

---

Biopolttoaineiden toimitusketjujen hallintaan on tehty ja on kehitteillä informaatiojärjestelmiä, joissa yhtenä osana tarvitaan tietoa kiinteiden polttoaineiden keskimääräisen kosteuden muutoksista raaka-aineen välivarastoinnin aikana. VTT:ssä on 1990- ja 2000-luvuilla kertynyt useista hankkeista laaja tutkimusaineisto erilaisten energiapuuvarastojen laadun muutoksista ja niihin vaikuttavista tekijöistä. Tätä aineistoa on mahdollista edelleen hyödyntää muodostettaessa tarvittavat laskentamallit kiinteiden polttoaineiden informaatiojärjestelmää varten. Tavoitteena on, että mallien avulla pystytään arvioimaan energiapuun laadun muutokset varastossa varastointiaikana.

## 2. Tavoite

---

Tavoitteena oli mallintaa energiapuuvarastossa tapahtuvien laatuominaisuuksien, ennen kaikkea kosteuden ajalliset muutokset, muodostamalla eri energiapuutavaroille vastaavat laskentafunktiot. Funktio ilmaisee varastoidun polttoaineen kosteuden muuttumista varastoinnin aikana, kun tiedetään sen lähtökosteus, varaston tekniset ominaisuudet, varaston ympäristöolot ja varastoinnin aikana vallinnut sää.

Tässä projektissa ei ollut rajallisten resurssien johdosta mahdollista tehdä kosteusmallista suoraan yritysten omaan informaatiojärjestelmään liitettävää sovellusta. Siksi ensisijaisena pyrkimyksenä oli luoda perusteet malleille, jotka voidaan räätälöidä yritysten tarpeiden mukaan. Kosteuden lisäksi tulevaisuudessa on mahdollista lisätä laskentafunktioihin muita seurattavia ominaisuuksia kuten esimerkiksi eri alkuaineiden määrä.

### 3. Tehtävän kuvaus

---

#### 3.1 Varastofunktioiden rakenteen määrittäminen

Polttoainetietojärjestelmää varten energiapuun laadun muutokset ajan funktiona on esitettävä laskentakaavan muodossa. Laskentakaava ottaa huomioon sekä varaston tekniset ominaisuudet, polttoaineen ominaisuudet että vallinneen tai ennustetun säätilan.

Tehtävässä haluttiin määrittää, mille polttoaineen ominaisuuksille varastofunktiot tarvitaan (kosteuden, lämpöarvon, tietyn kosteuden, alkuainepitoisuuden jne. muutoksen ennustaminen varastoinnin aikana), mitä lähtötietoja tarvitaan (esim. raaka-aineen alkuperä, historiatiedot ja valmistustapa; materiaalin ominaisuudet, kuten alkukosteus ja alkuainepitoisuudet; varaston koko, tiivistämistapa, peittämistapa; säähän liittyvät parametrit, yms.) ja mille ominaisuuksille on käytännössä mahdollista laatia funktiot.

Eri biopolttoaineiden laadun muutosta varastoinnin aikana on tutkittu useissa eri projekteissa Tekesin Bioenergian tutkimusohjelmassa ja Puuenergian teknologiaohjelmassa 1990 ja 2000 –luvulla. Tutkimuksissa on tarkasteltu, kuinka energiapuun kuivatuksella ja varastoinnilla voidaan vaikuttaa polttoaineen laatuun, etenkin sen kosteuteen, lämpöarvoon, energiatihyyteen sekä neulas- ja alkuainepitoisuuksiin. Tutkimuksissa ovat olleet mukana hakkuutähteet, paalatut hakkuutähteet (risutukit), nuorista metsistä korjattu kokopuu ja kannot. Varastopaikkojen sään seuranta on tallennettu tunnin välein ja voidaan kuvata jatkuvana muuttujana. Laatua kuvaavat muuttujat on tallennettu diskreetteinä muuttujina näytteenottohetkinä, noin neljä viisi kertaa varastointijakson aikana. Tutkimusten tulokset on esitetty yksittäisinä seurantatuloksina eikä niistä ole aiemmin tehty laskentamalleja.

Aiemmista tutkimuksista saatua aineistoa ja kokemusta hyödynnettiin laskentamallin muodostamisessa. Kertynyt aineisto pitää sisällään varastopaikassa vallinneen sään, varastossa olleen polttoaineen laadun muutokset ja varastointitekniikan vaikutuksen energiapuun laatuun. Varsinainen mallinnus ja sen verifiointi perustuu kuitenkin tehtävää varta vasten perustettujen energiapuukasojen seurantaan ja näytemittauksiin.

Koska puupolttoaineen tärkein laatuun vaikuttava tekijä on kosteus ja koska varastoidun energiapuun alkuainepitoisuuksien muutosten seuranta olisi ollut tässä vaiheessa liian suuri tehtävä, päätettiin tässä tutkimuksessa keskittyä metsävarastoidun energiapuun kosteuden muutosten mallintamiseen. Biovarma-hankkeen muissa osatehtävissä on tarkasteltu polttoaineiden sisältämien alkuaineiden vaikutusta kattilan polttotapahtumaan ja laskettu ns. turvallisia turve-puu seossuhteita. Lisäksi tutkittiin neulasten alkuaineiden muutoksia varastoinnin aikana.

#### 3.2 Varastofunktioiden mallintaminen

Kootun, lajitellun ja analysoidun aineiston perusteella valituille metsäpolttoaineille laadittiin varastofunktiot, jotka kuvaavat polttoaineen kosteuden muuttumista varastoinnin aikana varastointitavan ja sääolojen mukaan. Kosteusfunktioiden avulla energiapuuvarastojen kosteudet on mahdollista ennustaa tietyssä ajanhetkenä. Voimalaitoksen polttoaineiden hankkijat ja toimittajat voivat näin optimoida polttoaineiden toimituksia kulloisenkin käyttötilanteen mukaan ottaen huomioon myös tulevan käytön ennusteet ja varastossa olevan puun laadun.

### 3.3 Mallien oikeellisuuden toteaminen

Muodostettujen varastofunktioiden oikeellisuuden varmistaminen (verifiointi) suoritettiin kenttäkokein. Kenttäkokeet tehtiin yhdessä projektiin osallistuvan polttoaineen toimittajan, Metsähallituksen, kanssa heidän omilla varastoalueillaan. Kokeisiin valittiin erityyppisiä varastoja kullekin raaka-aineelle. Kokeissa seurattiin varastoalueella vallinnutta säätilaa ja energiapuun kosteuden muutoksia riittävän lyhyin aikavälein, jotta saatiin luotettava käsitys varastofunktioiden oikeellisuudesta. Kokeiden perusteella vielä tarkennettiin kosteuskäytöitä, jotta saatiin hyväksyttävä tarkkuus kosteuden muutoksen ennusteelle.

### 3.4 Hyödyntäminen informaatiojärjestelmässä

Laadittua mallia on mahdollista sovittaa ja soveltaa käyttöön energiapuun hankinnan informaatiojärjestelmässä. Malli auttaa optimoimaan toimituslogistiikkaa yhdistämällä energiapuun laadun laskenta keskenään kommunikoivien toimitusohjausjärjestelmän ja voimalaitoksen polttoaineen laadunhallintajärjestelmien kanssa.

## 4. Menetelmät

### 4.1 Puutavaralajien varastoseuranta

Kuivumisen ennustemallin muodostamiseksi eri energiapuupuutavaralajien kosteuden muutosta seurattiin kuudessa eri varastopaikassa vuoden ajan huhtikuusta 2012 alkaen. Varastokasat sijaitsivat noin 50 kilometrin säteellä Jyväskylästä eri puolilla Keski-Suomea, erilaisissa kuivumisympäristöissä. Taulukossa 1 on esitetty seurattujen varastokasojen puulaji, sijainti ja varastopaikan kuvaus.

*Taulukko 1. Seurannassa olleiden varastokasojen tiedot.*

Kasan numero	Puulaji	Sijainti	Ympäristö
1	Latvusmassa	Tikkakoski, Jyväskylä	Hiekkakuoppa
2	Ranka (sekapuu)	Oravasaari, Jyväskylä	Aukea, metsän reuna
3	Ranka (mänty)	Havumäki, Leivonmäki, Joutsa	Metsätie, varjopaikka
4	Ranka (mänty)	Ylä-Muuratjärvi, Jyväskylä	Aukea, metsän reuna
5	Kanto	Mikonranta, Muurame	Aukea, kääntöpaikka
6a	Kokopuu (mänty)	Kivisuo, Leivonmäki, Joutsa	Metsäteiden risteys
6b	Kokopuu (lehtipuu)	Kivisuo, Leivonmäki, Joutsa	Hakkuuaukon reuna

Varastokasoista otettiin kosteusnäytteet noin kuukauden välein purkamalla kasaa puutavara-auton kuormainta käyttäen tai vetämällä muutama rankapuu- tai kokopuu kasan poikkileikkauksen ylä- ja alaosaan (kuva 1). Näistä puista sahattiin erikseen näytepalat rankojen/kokopuiden molemmista päistä sekä keskikohdasta, jotka muodostivat aina yhden kokoomanäytteen. Latvusmassakasasta näytteet otettiin purkamalla kasaa. Näytteenoton jälkeen kasat koottiin ennalleen, jotta niiden muoto ja rakenne olisi pysynyt mahdollisimman samana koko mittausjakson aikana. Seuraava näytteenottokerta otettiin aina edellisen näytteenottokohdan vierestä. Kasojen kokoomanäytteet (kasan ylä- ja alaosaan erikseen) haketettiin ja kosteudet määritettiin laboratoriossa kuivaamalla uunissa standardin mukaisesti. Kuvatus kaltaisen kosteusnäytteenoton tarkkuudeksi voidaan aikaisempien tutkimusten perusteella arvioida  $\pm 3$  prosenttiyksikköä.



Varastokasoista peitettiin toinen puoli syksyllä, jonka jälkeen kosteusnäytteet otettiin sekä kasan peittämättömästä että peitetystä osasta. Ylä-Muuratjärvellä sijainnut rankapuukasa oli peitetty jo kasan teon yhteydessä kokonaan.



Kuva 1. Näytteenottoa rankapuukasasta.

## 4.2 Sään havainnointi

Kunkin varastokasan viereen asennettiin VTT:n sääasema, jolla mitattiin paikallinen vallinnut sää (kuva 2). Sääaseman mittaamien sääparametrien avulla ohjelma laskee vallinneen haihdunnan. Sään havainnoinnissa käytettiin hyväksi myös Ilmatieteen laitokselta tilattuja 10 x 10 km hilapisteissä laskettuja säätietoja Jyväskylän ympäristössä. Säätietoina käytettiin kunkin varastokasan lähintä hilapistettä.



Kuva 2. VTT:n sääasema, jolla mitattiin varastokasan ympäristön sääolosuhteet.

Varastokasan kosteuden muutoksen ennustamisessa voidaan puolestaan käyttää joko Ilmatieteen laitoksen ennustamaa säätä, pitkän aikavälin keskimääräisiä säätietoja tai sääasemilta suoraan saatavaa informaatiota. Mikäli halutaan päiväkohtaista seuranta, tarvitaan päivittäinen tai jopa tunnin välein säädä sääasemalta. Pitkän aikavälin keskimääräisinä sääoloina käytettiin vuosien 1991 – 2005 haihduntaa ja sadantaa, joiden kumulatiivisille summille muodostettiin laskentakaavat.

### 4.3 Varastokasan kosteuden muutoksen laskentamalli

Kosteuden ennustemallin muodostamisessa on lähdetty oletuksesta, että materiaalin kosteuden muutos riippuu itse raaka-aineesta, sen kosteudesta varaston tekohetkellä, varaston ympäristöoloista ja vallitsevasta säätilasta. Laskentamallin parametrien määrittämiseksi tarvitaan mm. raaka-aineen kosteus kuivumisen eri hetkillä sekä vallinneet sääolot. Tätä varten seurattiin hakkuutähde-, ranka-, kokopuu- ja kantovarastojen kosteuden muutosta määrävälein edellä kuvatulla tavalla.

Kosteuden muuttuminen ajan funktiona lasketaan yhtälöstä:

$$w_{i+1} = w_i + a \cdot \Sigma P / (w_i - w_{eq} + b) + c \cdot \Sigma E (w_i - w_{eq}) \quad (1)$$

missä

$w_i$  = materiaalin vesipitoisuus hetkellä  $t_i$  ( $\text{kg}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{kg}_{\text{dm}}$ )

$w_{eq}$  = materiaalin vesipitoisuus tasapainotilassa

$\Sigma E$  = haihdunta ajanjaksolla  $t_i - t_{(i+1)}$ , mm

$\Sigma P$  = sadanta ajanjaksolla  $t_i - t_{(i+1)}$ , mm

a, b ja c ovat kokeellisia kertoimia

Kertoimet a, b ja c on määritetty mittaustuloksista siten, että saatu funktio vastaa mahdollisimman hyvin mittaustuloksista saatuja kosteuden arvoja. Samalla vakiot a ja c skaalaavat sadannan ja haihdunnan vaikutuksen samaan suuruusluokkaan kosteuden muutosten kanssa. Kosteuden kuukausimuutosten suuruusluokka on 0,1, kun taas sadannan ja haihdunnan arvojen suuruusluokka on 10 (yksikkö mm/kk). Lisäksi a ja c (kk/mm) muuttavat yksiköt funktion molemmilla puolilla samoiksi.

Laskenta alkaa hetkestä  $t_i = t_0$ , jolloin  $w_i = w_0$  = materiaalin alkuperäinen kosteus. Ajanjakson  $t_i - t_{(i+1)}$  pituus voi olla esim. päivä, viikko tai kuukausi, miten yksityiskohtaisia säätietoja on käytettävissä. Ilmatieteen laitoksen keräämät pitkän aikavälin keskimääräiset sääolosuhteet, joista saadut kuukausittaiset haihdunnat, sadannat ja ilman suhteellinen kosteus on esitetty taulukossa 2. Vastaavat puumateriaalin tasapainokosteudet on laskettu kuvan 3 polynomisovitteista (kaava 2). Polynomisovitteet saadaan käyrästöistä, joissa on esitetty mitatut tasapainokosteudet ilman lämpötilan ja suhteellisen kosteuden funktiona, kuten esim. liitteen 1 käyrästöstä.

*Taulukko 2. Ilmatieteen laitoksen keskimääräisiä kuukausittaisia säätietoja 1991 – 2005 ja niistä laskettu puumateriaalin tasapainokosteus (Ilmatieteen laitos).*

Kuukausi	Sadanta, mm	Haihdunta, mm	Ilman suhteellinen kosteus, %	Puumateriaalin tasapainokosteus, %
Tammi	53	9	87	22.3
Helmi	29	6	86	21.7
Maalis	28	32	81	19.2
Huhti	38	68	70	14.8
Touko	51	97	61	12.3
Kesä	63	110	65	13.4
Heinä	70	103	68	14.2
Elo	72	77	76	17.0
Syys	67	40	81	19.2
Loka	59	5	86	21.7
Marras	52	6	89	23.4
Joulu	49	7	89	23.4

Ulkona varastoidun puun tasapainokosteus prosentteina ( $= 100 \cdot w_i / (w_i + 1)$ ) riippuu ilman lämpötilasta ja suhteellisesta kosteudesta. Sen kuvaaja ilman suhteellisen kosteuden funktiona on esitetty kuvassa 3, mihin piirretty käyrä vastaa 5-15 °C lämpötilaa. Käyrät piirrettiin vastaten 5, 10 ja 15 °C lämpötilaa, mutta erot jäivät niin pieniksi, että kuvassa 3 on esitetty vain 10 °C vastaava käyrä, koska 5, 10 ja 15 °C lämpötilaa vastaavat käyrät menevät käytännöllisesti katsoen päällekkäin. Haluttua ilman suhteellista kosteutta vastaava puun tasapainokosteus voidaan hakea kuvan 3 käyrästä (tai hieman tarkemmin käyrästä, jos lämpötila poikkeaa merkittävästi lämpötilaväliltä 5 – 15 °C) tai laskea sen polynomisovitteesta:

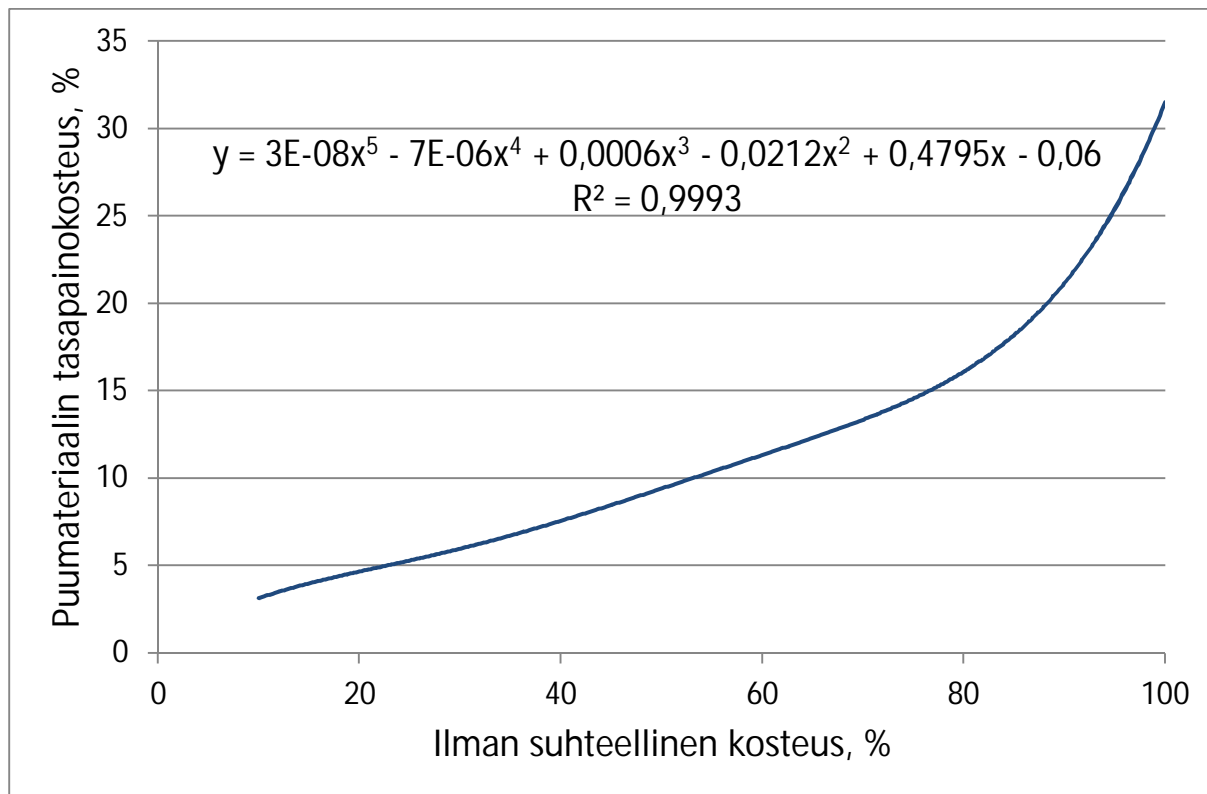
$$y = 3E-08x^5 - 7E-06x^4 + 0.0006x^3 - 0.0212x^2 + 0.4795x - 0.06 \quad (2)$$

Yhtälön 1 muuttuja  $w_{eq}$  lasketaan puun tasapainokosteudesta. Yhtälöstä näkyy, että sadannan vaikutus materiaalin vesipitoisuuden muutokseen suurenee, kun vesipitoisuus ja tasapainotilaa vastaavan vesipitoisuuden ero pienenee, eli siis mitä lähempänä vesipitoisuus on tasapainotilaa, sitä enemmän sadanta nostaa vesipitoisuutta. Juuri näin käytännössä tapahtuu. Vastaavasti haihdunta taas vaikuttaa sitä enemmän, mitä kauempana vesipitoisuus on tasapainotilaa vastaavasta arvosta.

Jos haihduntaa tarkastellaan fysikaalisesti tarkasti, tulisi laskea materiaalin pintalämpötilan kylläistä tilaa vastaava ilman kosteus, josta sitten vähennetään sen hetkinen ilman kosteus. Erotusta olisi sitten korjattava vielä vakiokertoimella, jolla skaalataan erotus vastaamaan haihtuvaa massavirtaa, joka siten riippuu lineaarisesti mainitusta erotuksesta. Lisäksi tällöin pätee yhtälö: höyrystyvä massavirta  $\times$  höyrystymislämpö = lämpövirta (ympäristöstä tai materiaalista riippuen niiden lämpötiloista). Tämän tyyppinen laskenta muodostuu kuitenkin hyvin monimutkaiseksi, koska tällöin mm. tarvittaisiin lähes jatkuvasti mitattua säädataa ja

lisäksi pitäisi laskea mm. materiaalin pintalämpötila ajan funktiona. Silloin lämpötilan jakauma ajan funktiona materiaalin syvyys suunnassa pitäisi myös laskea. Tällöinkin jouduttaisiin oletamaan, että materiaalin pinta on aina niin kostea, että ilman kosteus välittömästi pinnassa vastaa kylläistä tilaa.

Kun otetaan huomioon, että kuivumiseen vaikuttavat monet seikat, joita ei käytännössä voida tarkasti kuitenkaan tietää tai ottaa huomioon, niin laskentaa ei kannata tehdä liian yksityiskohtaiseksi. Tällaisia seikkoja ovat esim. se miten kasat on pinottu, kasassa on halkaisijaltaan erikokoisia puita, kasan paikan vaikutus, sen alusta jne.



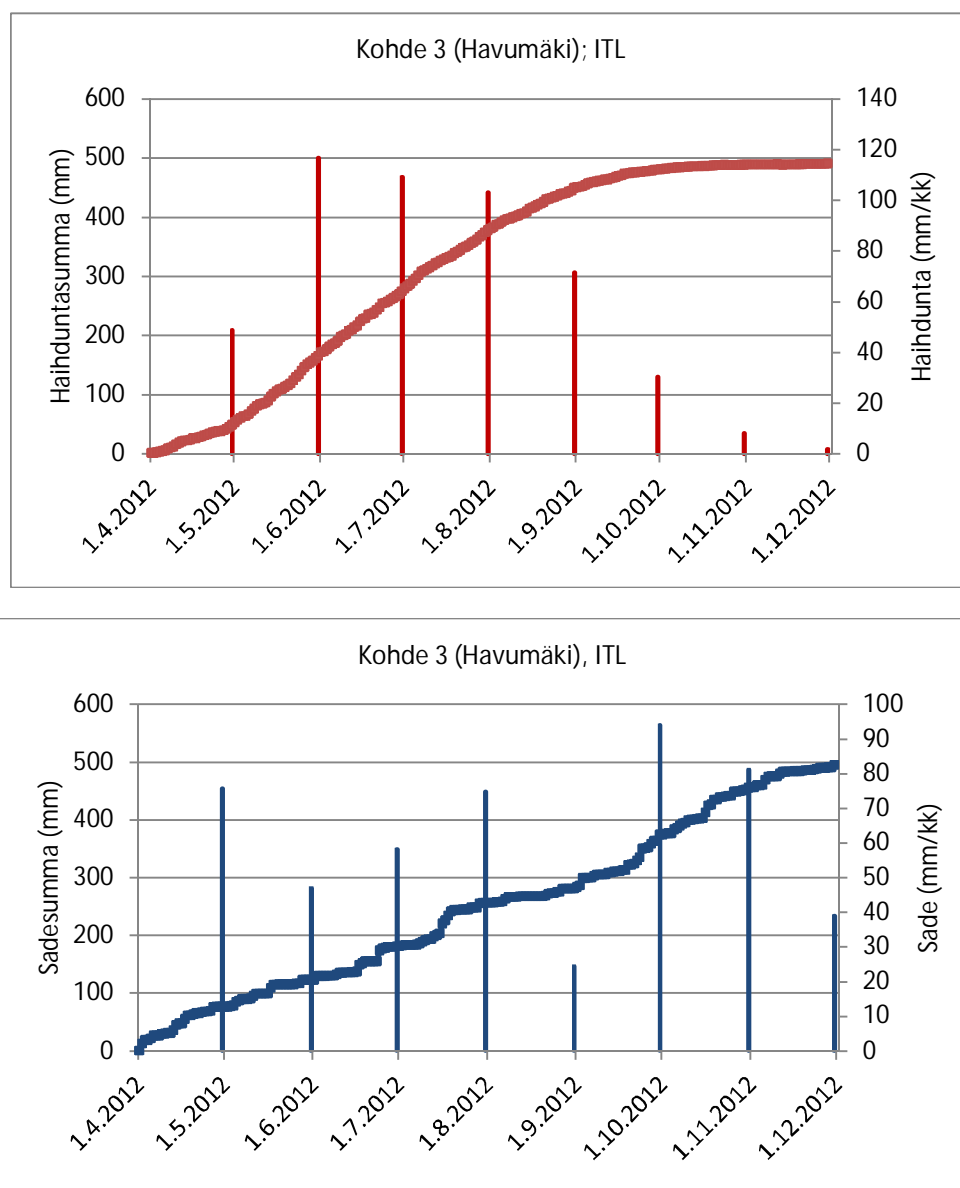
Kuva 3. Puumateriaalin tasapainokosteus ilman suhteellisen kosteuden funktiona, kun ilman lämpötila on 10 °C.



## 5. Tulokset

### 5.1 Vuoden 2012 sääolot

Kunkin varastoalueen paikallinen sää mitattiin VTT:n sääasemalla, jota verrattiin Ilmatieteen laitokselta saatuun varastoalueen lähimmän hilapisteen laskettuun sähän. Kuvassa 4 on esitetty esimerkkinä VTT:n sääasemalla mitattu haihdunta ja sadanta Havumäellä sijainneen rankapuukasan ympäristössä. Pylväät kuvaavat haihdunnan ja sadannan summaa eri kuukausina ja yhtenäinen käyrä niiden kumulatiivista summaa. Kuukausittainen haihdunta kasvaa heinäkuuhun asti, jonka jälkeen se alkaa tasaisesti vähetä. Yleisesti ottaen vuoden 2012 haihdunta noudatti verraten tarkasti pitkän keskiarvon mukaista haihduntaa, mutta sadanta oli jonkin verran keskiarvoa suurempi, etenkin keväällä ja alkusyksyllä.



Kuva 4. VTT:n sääasemalla mitattu haihdunta- ja sadesumma Havumäessä 2012.

Pitkän aikavälin keskiarvon haihdunta- ja sadesummaa voidaan käyttää eri puutavaralajien kosteuden muutoksen ennustamisen laskennassa. Kuvissa 5 ja 6 on esitetty pitkän aikavälin keskiarvon haihdunta- ja sadesumma (pisteet) sekä niihin tehdyt polynomisovitteet

(yhtenäinen viiva). Eri puutavaralajien kosteuden muutoksen ennustamisessa tarvittava haihdunta-arvo voidaan laskea riittävällä tarkkuudella viidennen asteen polynomisovitteella:

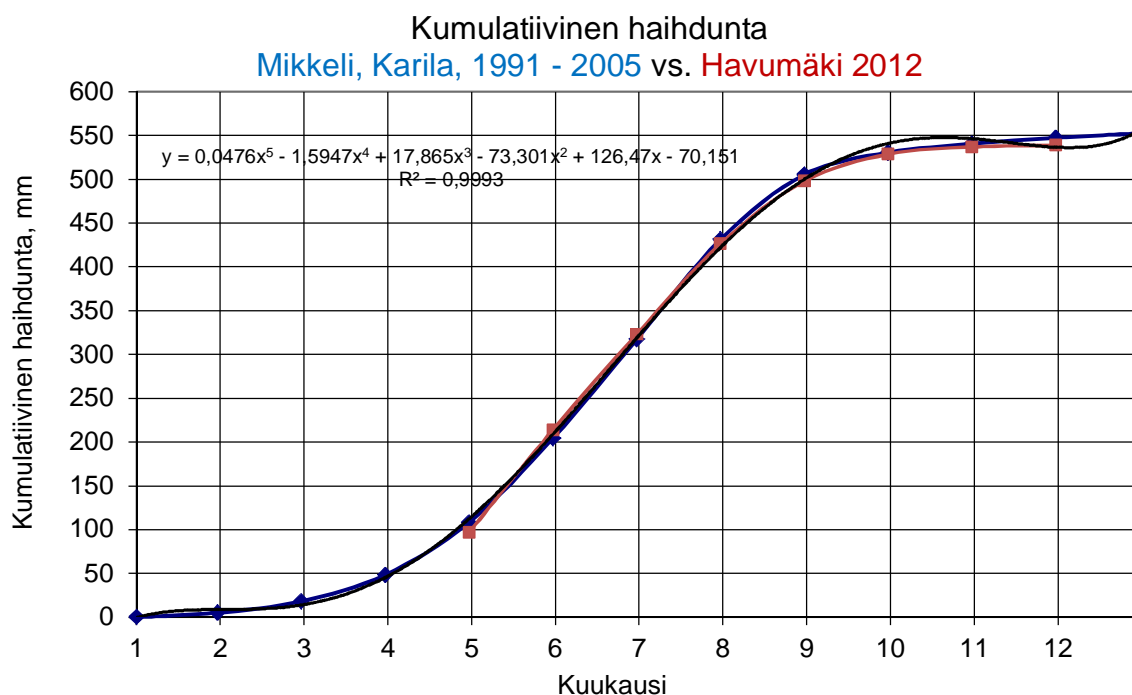
$$\Sigma E \text{ (mm)} = 0,0476x^5 - 1,5947x^4 + 17,865x^3 - 73,301x^2 + 126,47x - 70,151 \quad (3)$$

jossa x on kuukauden numero (tammikuu = 1, jne). Sovitteen selitysaste  $R^2 = 0,9993$ .

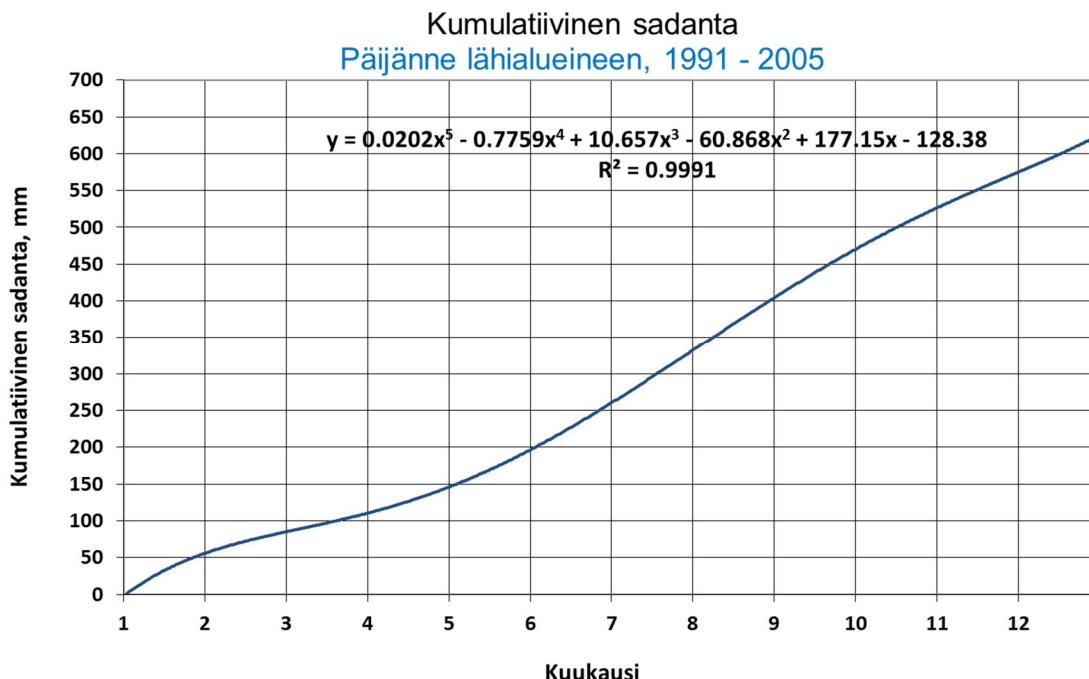
Sadesumma taas voidaan laskea polynomisovitteesta:

$$\Sigma P \text{ (mm)} = 0.0202x^5 - 0.7759x^4 + 10.657x^3 - 60.868x^2 + 177.15x - 128.38 \quad (4)$$

jonka selitysaste  $R^2 = 0,99917$ .



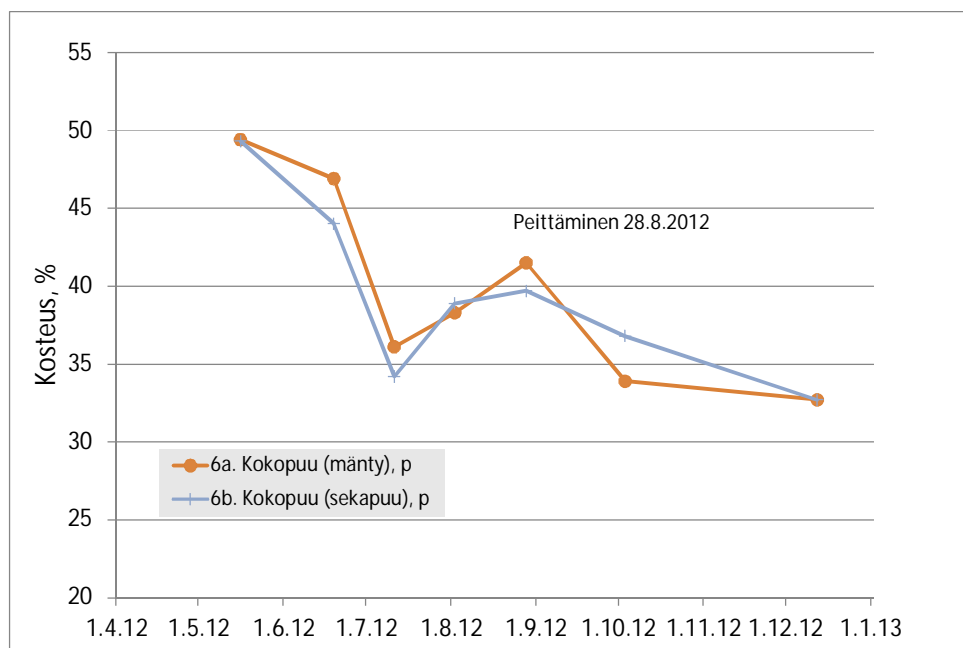
Kuva 5. Kumulatiivinen haihdunta.



Kuva 6. Kumulatiivinen sadanta.

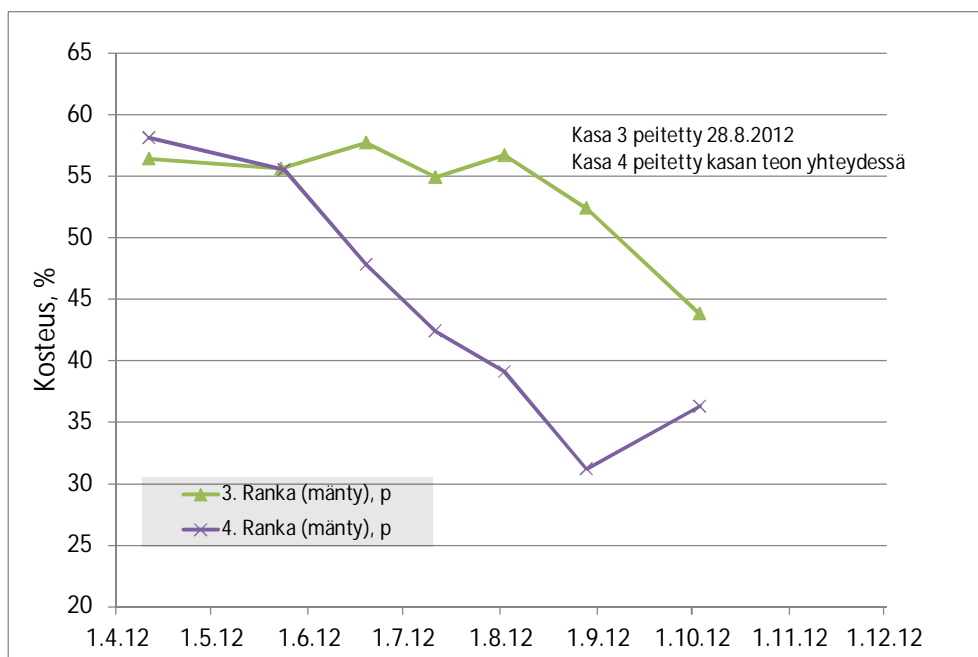
## 5.2 Puutavaralajien kuivuminen vuoden 2012 sääoloissa

Kuvissa 7–9 on esitetty eri puutavaralajien kuivuminen seurantajakson aikana. Kokopuukasat (mäntyvaltainen ja sekapuu), jotka sijaitsivat muutaman sadan metrin etäisyydellä toisistaan avoimilla paikoilla, kuivuivat samaa tahtia. Kokopuukasat kuivuivat noin 35 prosenttiin heinäkuun alkuun mennessä, mutta kastuivat paikallisten sateiden vaikutuksesta heinä- ja elokuun aikana noin 40 prosenttiin. Kasat peitettiin kahdella rinnakkaisella peittopaperilla elokuun lopussa, joka suojaasi varastokasoja syys- ja lokakuun sateilta ja edesauttoi kasojen kuivumista loppuvuonna.



Kuva 7. Mäntyvaltaisen ja sekapuuta sisältävän kokopuukasojen kuivuminen aukealla paikalla.

Kuvassa 8 on esitetty mäntyvaltaisten rankapuukasojen kuivuminen erilaisissa kuivumisympäristöissä. Varastokasa 4 sijaitsi puoliavoimella paikalla ja oli peitetty jo kasan teon yhteydessä. Varastokasa 3 puolestaan sijaitsi varjoisessa ympäristössä ja kasa peitettiin elokuun lopussa. Kasat sijaitsivat eri puolilla Keski-Suomea. Varjoisessa paikassa ollut kasa 3 ei kuivunut kevään ja kesän aikana juuri lainkaan, johtuen kesän voimakkaista paikallisista sateista. Kasan peittäminen elokuun lopulla suojasi kasaa kuitenkin hyvin sateilta ja syksyn aikana rangat kuivuivat noin 44 prosenttiin. Avoimella paikalla ollut peitetty kasa kuivui sen sijaan hyvin kesän aikana ja saavutti noin 30 prosentin kosteuden, joskin syyssateet kastelivat uudelleen rankoja hieman.

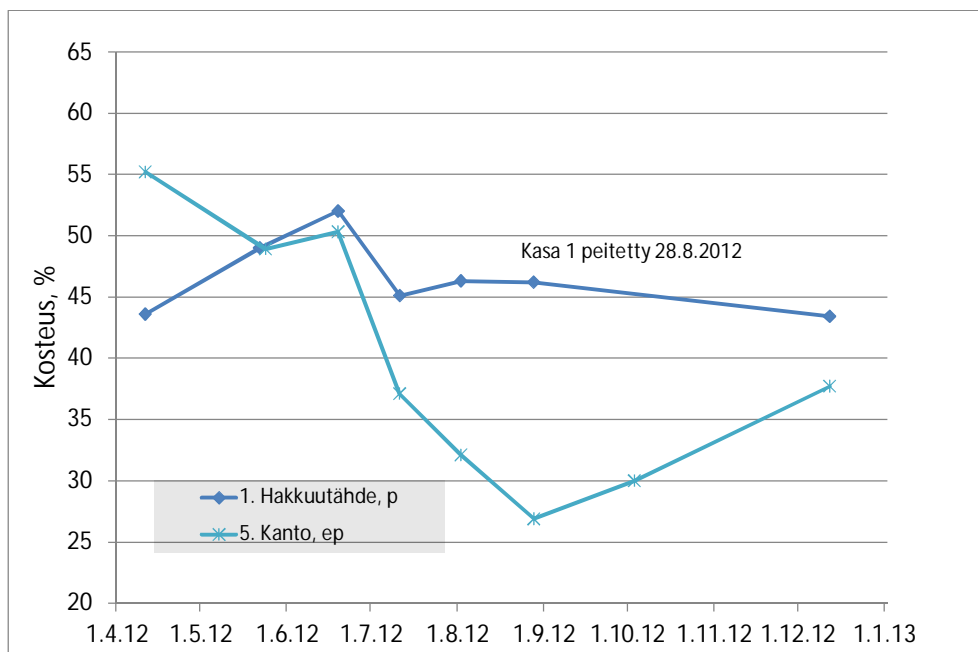


Kuva 8. Erilaisissa kuivumisympäristöissä olleiden rankapuukasojen kosteuden muutos seurantajakson aikana.

Kuvassa 9 on esitetty avoimilla paikoilla olleiden latvusmassakasan ja kantopuukasan kuivuminen. Varastointijakson alussa latvusmassakasa kastui kevään paikallisten sateiden johdosta noin 10 prosenttiyksikköä, mutta kuivui heinäkuun alkuun mennessä lähtökosteuteen. Kasa peitettiin elokuun lopussa, mutta se ei auttanut kasan kuivumista loppuvuonna. Osittain tämä saattoi johtua kasan muodosta, koska kasa oli matala ja laakea.

Kantopuukasa kuivui hyvin kesän aikana ja saavutti noin 26 prosentin kosteuden elokuun loppuun mennessä. Kantopuukasaa ei peitetty missään vaiheessa varastointijakson aikana. Tämän johdosta kasa kastui syyssateiden aikana noin 38 prosenttiin.





Kuva 9. Latvusmassakasan ja kantopuukasan kuivuminen seurantajakson aikana.

### 5.3 Varaston sijaintipaikan ja peittämisen vaikutus kuivumiseen

Luonnollisesti paikalliset sääolot vaikuttavat energiapuun kuivumiseen ja laadun säilymiseen kaikkein voimakkaimmin. Seuraavaksi eniten siihen vaikuttaa varastopaikan sijainti ja ympäristö. Hyvä kuivuminen edellyttää vähäisen sateen ja riittävän lämpötilan lisäksi riittävän alhaista ilmakehän kosteutta sekä mahdollisimman paljon auringon säteilyä ja tuulta. Varjossa sijaitseva varastokasa voi jäädä 7-17 prosenttiyksikköä märemmäksi kuin hyvälle ja avoimelle paikalle sijoitettu auma (Hillebrand 2004). Metsätien varressa kuivumisolosuhteet eivät vaihteile yhtä voimakkaasti kuin aukealla paikalla ja puun kosteuden aleneminen ja toisaalta uudelleen kostuminen on tasaisempaa kuin esimerkiksi terminaalissa tai vastaavassa paikassa. Varasto ei saisi missään tapauksessa sijaita notkopaikassa, johon pääsee valumavesiä. Hyvä varastopaikka on kuivapohjainen, aukea, tuulinen ja eteläaurinkoon päin oleva alue (Lepistö 2010).

Varastokasojen peittämisen on myös havaittu edistävän kuivumista, sillä oikein aseteltu peittopaperi estää tehokkaasti enimmäkseen sadeveden ja lumen pääsyn kasan sisään. Aiemmissa tutkimuksissa on havaittu, että kokopuukasojen peittämisellä on saavutettu noin kuusi prosenttiyksikköä alempi keskimääräinen kosteus varastoinnin lopussa verrattuna peittämättömiin kasoihin. Hakkuutähteillä vaikutuksen on todettu olevan vieläkin suurempi eli 10-15 prosenttiyksikköä (Hillebrand 2009).

Kappaleessa 5.2 on kuvattu, kuinka tämän tutkimuksen varastokasojen keskimääräinen kosteus on muuttunut seurannan aikana. Aiemmin on todettu, että kesä 2012 oli tavanomaista selvästi sateisempi, mikä selittää kasojen huonon kuivumisen. Silti vertailukasoissa, esimerkiksi rankapuukasat 3 ja 4 (kuva 8), havaitaan selvästi molempien sekä varastopaikan että peittämisen suotuisa vaikutus. Syyskuun lopussa tehtyjen mittausten mukaan hyvällä paikalla varastoitu peitetty kasa oli jopa 20 prosenttiyksikköä kuivempi kuin metsän varjossa ollut peittämätön auma.

## 5.4 Puun kuiva-ainehäviöt varastoinnin aikana

Hakkeen kuiva-ainetappioiden määrittäminen tarkasti tunnetuilla menetelmillä on varsin haasteellista. Ideaalinen puun kuiva-ainepitoisuuden määrittäminen olisi nopea, halpa, tarkka ja toimisi myös jäiselle puulle. Perinteiset uunikuivaus ja hydrolyysi ovat tarkkoja, mutta ne ovat hitaita. Suurin osa käytössä olevista menetelmistä perustuu sekä sähkömagneettisen säteilyn ja materiaalin vuorovaikutukseen että kuiva-ainemäärän selvittämiseen määrittämällä materiaalin kosteuspitoisuus. Nämä menetelmät edellyttävät kuitenkin kalibrointia tunnetuilla näytteillä ja toimivat tarkasti vain vastaavilla analyysierillä. Lisäksi kaikkien menetelmien tarkkuutta heikentää näytteiden edustavuus. Varastokasojen sisällä kosteus, palakoko, puulaji, neulasten määrä, jne. voivat vaihdella hyvinkin paljon. (Martiskainen 2012). Edellä mainituista syistä ja resurssien rajallisuudesta johtuen energiapuun varastokasojen kuiva-ainehäviöitä ei voitu selvittää tässä tutkimuksessa.

Kuiva-aineen muuttumista hakkeen varastoaumoissa on tutkittu jonkin verran, mutta vastaavaa tutkimusta ei ole juuri tehty hakettamattomista raaka-aineverastoista. Jotta asiasta saisi jonkinlaisen kuvan, on tähän koottu keskeisiä metsähakkeen varastotutkimuksista saatuja tuloksia. Korostettakoon vielä, että nämä tulokset eivät välttämättä päde metsähakkeen raaka-aineverastoihin. Oletettavaa on, ettei vastaavaa lämpötilan nousua ja yhtä voimakkaita kemiallisia reaktioita tapahdu hakkuutähde-, ranka-, tai kokopuukasoissa. Siten myös kuiva-ainehäviöt ovat oletettavasti pienempiä.

Kuiva-ainetappiot aumassa johtuvat mikrobitoiminnasta ja kemiallisesta hajoamisesta. Nämä tapahtumat kuluttavat happea ja muodostavat hajoavasta kuiva-aineesta hiilidioksidia. Auman koko, muoto, korkeus, lämpötila, peittäminen sekä hakkeen palakoko, kosteus ja viheraineiden määrä vaikuttavat, kuinka nopeasti ja tehokkaasti kuiva-ainetta tuhoutuu (Garstang ym. 2002). Mikrobitoiminnalle olosuhteet ovat otolliset, kun materiaalin kosteus on yli 30 % ja lämpötila 20 °C. Kuiva-aineen kemiallista hajoamista kuitenkin tapahtuu merkittävästi vasta lämpötilan ylitettyä 40 °C (NT Method 2008). Viheraineiden sisältämät ravinteet kiihdyttävät mikrobitoimintaa. Matalamman auman lämpötila pysyy korkeaa alempana, koska siinä on vähemmän haketta ja toisaalta koska lämmön haihtuminen on tehokkainta kasan päälyskerroksissa. Ilmankiertoa ei juuri pääse tapahtumaan suuren kasan sisällä. Hajoavien solujen yhdisteet reagoivat kiivaasti ilman hapen kanssa synnyttäen lämpöä. Nämä orgaanis-kemialliset reaktiot kiihtyvät lämpötilan noustessa ja voivat lopulta aiheuttaa aumapalon. (Martiskainen 2013)

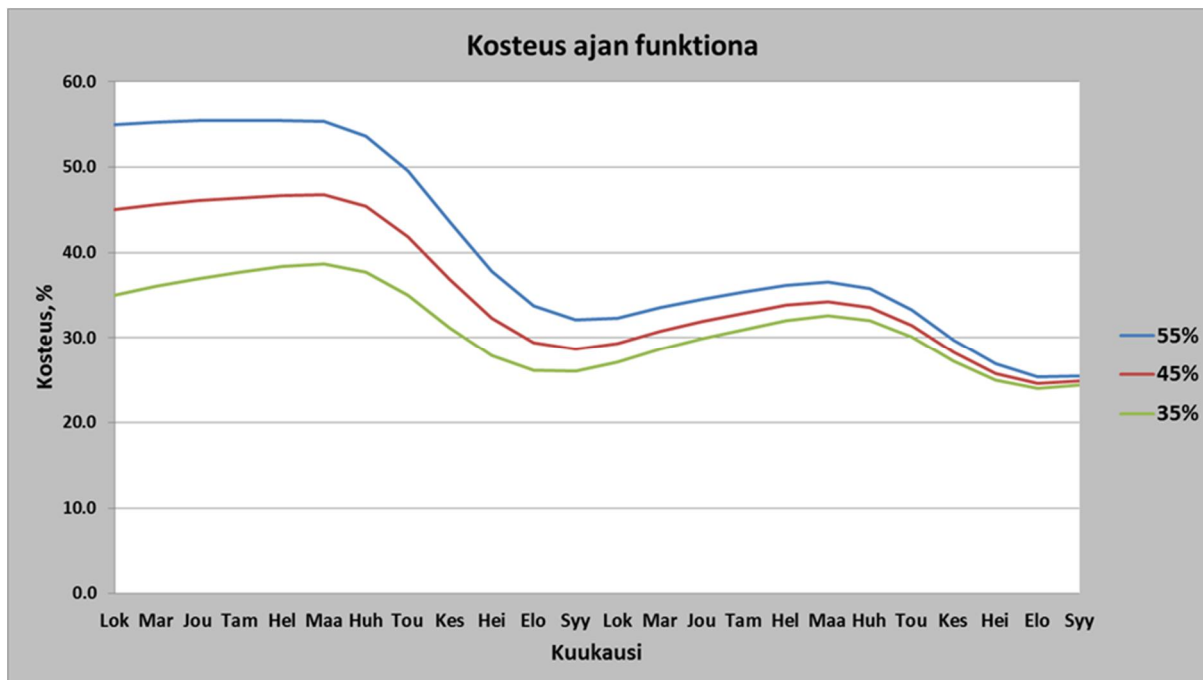
Uumajan maatalousyliopiston tutkimuksessa (Thörnqvist ym. 1990) suuren hakkuutähdeistä tehdyn hakeauman kuiva-ainetappiot 28 viikon seuranjaksolla olivat yhteensä hieman yli 11 %. Ensimmäisellä viikolla ne olivat kuitenkin jopa 3,6 % aleten sitten nopeasti noin yhteen prosenttiin kuukaudessa. Hakeauman kosteus vaihteli 35 ja 50 prosentin välillä ja siinä oli runsaasti mukana viherainesta. Uudemmassa itävaltalaisessa tutkimuksessa (Heinek ym. 2012) tuoreen, runsaasti kuorta sisältäneen rankahakkeen (alkukosteus n. 50 %) kuiva-ainetappioiksi mitattiin n. 11 % viiden kuukauden tarkastelujaksolla. Tässä tutkimuksessa hakekasat olivat verraten pieniä, kukin ainoastaan 15-20 irtom<sup>3</sup>. Molemmista tutkimuksista kuiva-aineen muutosta mitattiin ns. pussimenetelmällä. Se tarkoittaa yksinkertaisesti sitä, että hakeaumassa olevaa haketta laitetaan tarkasti mitattu määrä erillisiin pusseihin, jotka sijoitetaan kasan sisään. Näissä pusseissa olevan hakkeen kosteus ja kuiva-ainemäärä voidaan siten erikseen määrittää haluttuna ajankohtana.

## 5.5 Esimerkkejä varastokasan kuivumisen laskennasta

### 5.5.1 Kuivuminen pitkän aikavälin keskimääräisissä sääolosuhteissa

Kuvassa 10 on laskettu esimerkki tapauksesta, jossa on käytetty pitkän aikavälin (taulukko 2) keskimääräisiä kuukausittaisia haihdunnan, sadannan, ilman suhteellisen kosteuden ja siitä lasketun puumateriaalin tasapainokosteuden arvoja. Puuraaka-aine on mäntyrankaa, jonka

kosteus on ollut aluksi 35, 45 tai 55 % lokakuun alussa. Puun kosteuden muuttuminen on laskettu 2 vuoden ajalta.



Kuva 10. Mäntyrankakasan keskimääräisen kosteuden muutos pitkän aikavälin keskimääräisissä sääolosuhteissa. Käyrät edustavat kolmea eri lähtökosteutta. Kyseisessä laskentafunktiossa on käytetty seuraavia kertoimia:  $a=0,0028$ ,  $b=5$  ja  $c=0,0028$ .

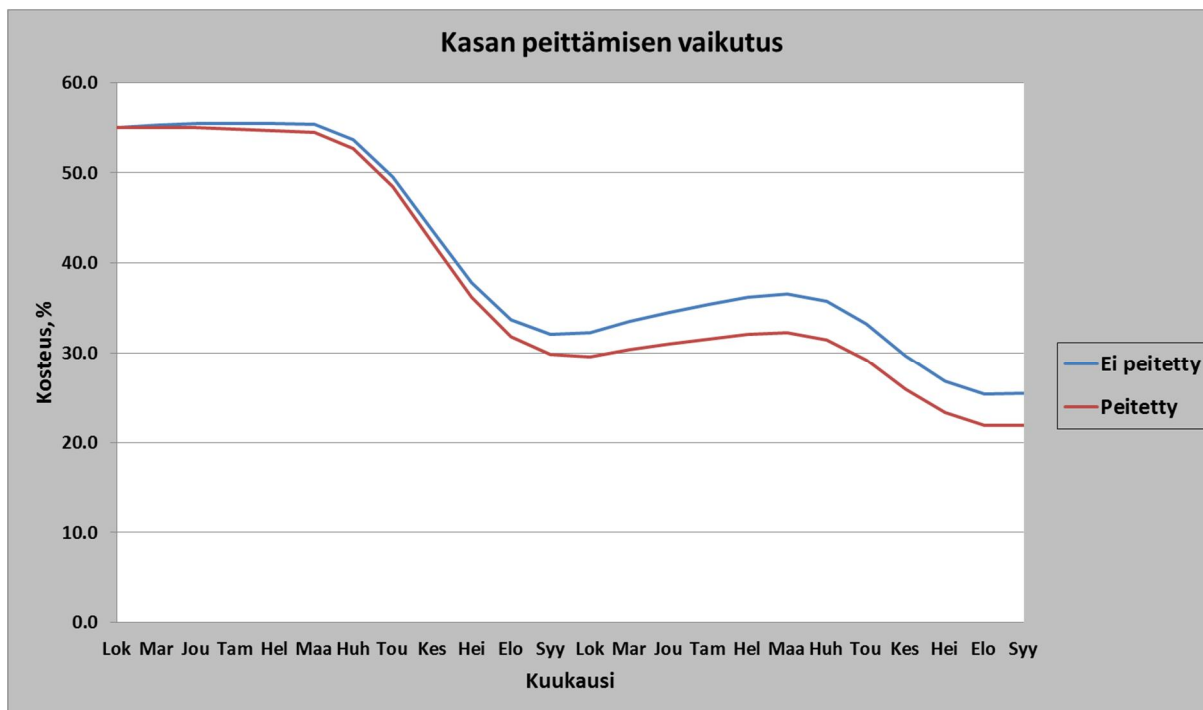
Ensimmäisten kuukausien aikana kosteus jopa nousee, kuten voisi olettaakin katsomalla taulukossa 2 olevia näitä kuukausia vastaavia sadannan ja haihdunnan arvoja. Ensimmäisen kevään ja kesän jälkeen kosteimmatkin rankakasat soveltuisivat jo polttoon sellaisillakin laitoksilla, joiden kattiloissa ei voida käyttää tietyn kosteusprosentin ylittäviä hakkeita, esim. kiinteistökokoluokan kattiloihin.

Rankakasan korkeus vaikuttaa myös sen kuivumiseen ja toisaalta se riippuu samalla myös siitä, miten voimakkaita ja pitkiä sadejaksot ovat. Jos verrataan kahta eri tapausta, jossa esimerkiksi toinen kasa on 4 m ja toinen 2 m korkea, 4 m korkean kasan kuivuminen on todennäköisesti nopeampaa. Tämä johtuu siitä, että jos sadejaksot ovat sellaisia, ettei sadevettä tunkeudu kasan läpi kuin esimerkiksi metrin syvyydeltä (sadetta suhteellisen vähän kerrallaan), imeytyy sadevedestä sama absoluuttinen määrä sekä 4 että 2 metrin kasaan. Koska 4 metrin kasan massa (~ pinta-ala) on ennen sadetta kaksinkertainen 2 metrin kasaan verrattuna, imeytyy siihen massayksikköä kohden vain puolet siitä mitä matalampaan kasaan, ja kosteus nousee vastaavasti vähemmän. Toisaalta haihdunta on kummassakin kasassa verrannollista sen kokonaispinta-alaan (~ korkeuteen), joten molemmista kasoista haihtuu massayksikköä kohden saman verran vettä eli kasan korkeus ei vaikuta siihen, kuinka kasan kosteus muuttuu haihdunnan vaikutuksesta. Sen vuoksi kasan korkeudella on vaikutusta sadannan ja haihdunnan yhteisvaikutukseen eli käytännössä kasat kannattaa tehdä mahdollisimman korkeiksi. Silloin jos sateet ovat niin voimakkaita, että sadevesi läpäisee täysin myös 4 metrin kerroksen, vaikuttaa sadanta molempien kasojen kosteuteen oletettavasti saman verran eli kasan korkeudella ei ole tässä suhteessa merkitystä. Tällaisia sateita on kuitenkin Suomessa hyvin harvoin.

## 5.5.2 Kasan peittämisen vaikutus

Kuvassa 11 näkyy kasojen peittämisen vaikutus, mikä riippuu tietysti siitä, miten hyvin kasat on peitetty. Kuvan esimerkissä peittämisen vaikutuksen laskennassa on oletettu, että

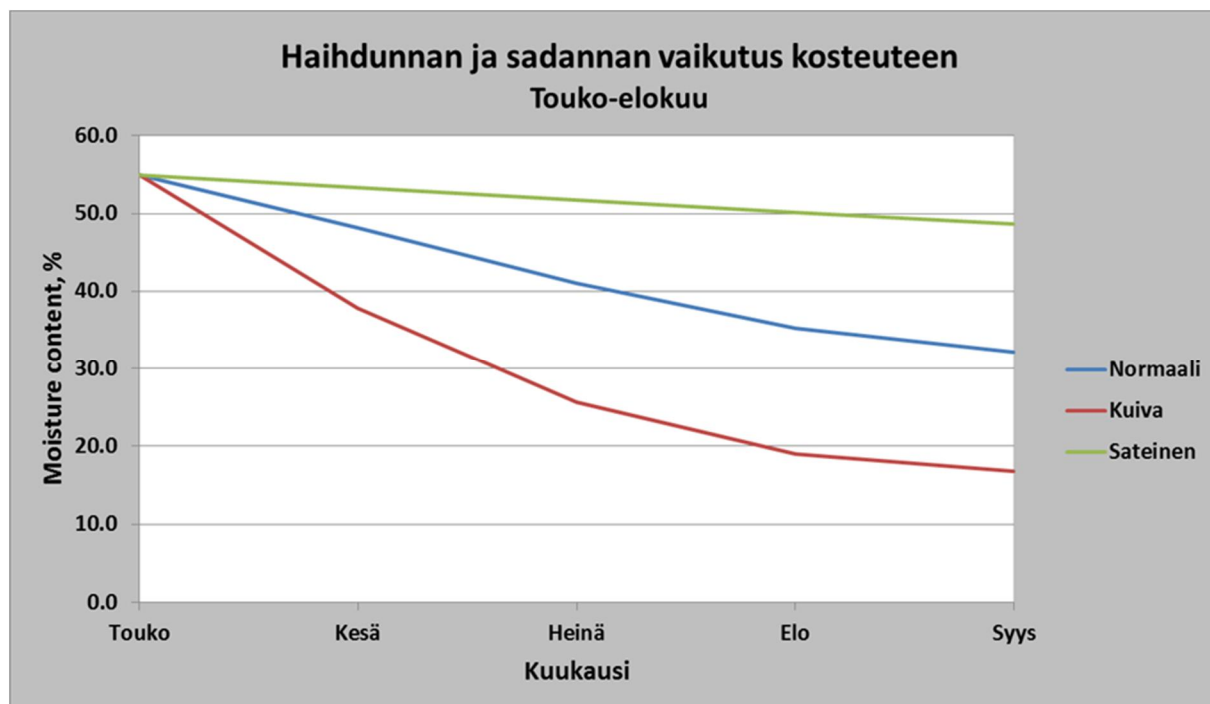
peittäminen vähentää varastokasaan kohdistuvaa sadantaa 80 %, mutta ei vaikuta haihduntaan. Esimerkkitapauksessa peittämisen vaikutus kasan kosteuteen on ollut n. 5 %-yksikköä käytetyillä oletusarvoilla. Peittämisellä pyritään luonnollisesti vähentämään sateen vaikutusta, mutta ennen kaikkea estämään lumen pääsy kasan sisälle. Katteet poistetaan yleensä kasan purkamisen yhteydessä.



Kuva 11. Peittämisen vaikutus varastokasan kosteuteen pitkän aikavälin keskimääräisissä sääolosuhteissa.

### 5.5.3 Kesän sääolosuhteiden vaikutus kuivamiseen

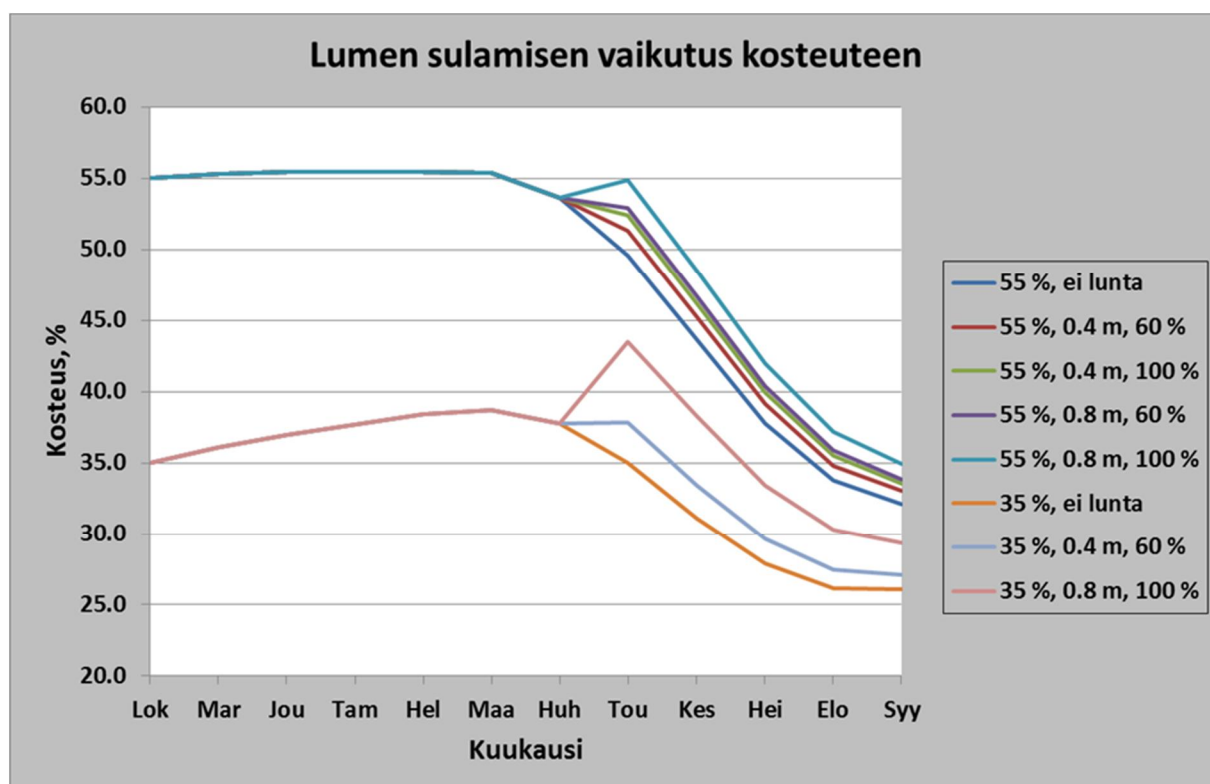
Kuvassa 12 on esitetty, miten kesän aikainen sadanta ja haihdunta vaikuttavat energiapuun kosteuteen kaikkein parhaimpina kuivumiskuukausina (touko-elokuu). Sininen käyrä vastaa normaalia kesää. Laskennassa on tällöin käytetty edellä mainittuja pitkän aikavälin keskimääräisiä sadannan ja haihdunnan arvoja. Sateiselle kesälle on käytetty korkeita sadannan (120 mm/kk) ja pieniä haihdunnan (20 mm/kk) arvoja, kuivalle kesälle taas päinvastoin (20 ja 150 mm/kk). Sateisena kesänä polttoaine kuivaa vain n. 6-7 prosenttiyksikköä, kun taas kuivana kesänä sen kosteus voi saavuttaa lähes tasapainokosteuden. Kesän sääolosuhteiden vaikutus on joka tapauksessa hyvin merkittävä. Sateisen tai kuivan kesän vaikutuksesta kosteus voi muuttua n. 15-20 prosenttiyksikköä normikesään verrattuna tässä esimerkkitapauksessa käytetyillä sadantojen ja haihduntojen arvoilla.



Kuva 12. Haihdunnan ja sadannan vaikutus puumateriaalin kosteuteen.

#### 5.5.4 Lumen sulamisen vaikutus

Lumen sulamisen vaikutus näkyy kuvassa 13. Tällöin on oletettu, että kaikki kasan päälle kertynyt lumi sulaa huhtikuun aikana ja siitä tuleva vesi jakautuu tasaisesti koko kasan korkeudelle. Lähtöarvoina on käytetty taulukossa 3 esitettyjä arvoja.



Kuva 13. Lumen sulamisen vaikutus puukasan kosteuteen.

Lähtöarvoista on vaihdeltu materiaalin alkuperäistä kosteutta (55 ja 35 %), lumikerroksen paksuutta (0.4 ja 0.8 m) sekä puutavaraan imeytyvän veden osuutta (60 ja 100 %), kuten näkyy kuvan 13 seliteosassa.

*Taulukko 3. Lumen sulamisen vaikutuksen laskennassa käytetyt lähtöarvot.*

Lähtöarvot:				
Varastokasan korkeus			4 m	
Puutavaran kuiva-tuoretiheys			430 kgka/m3	
Puutavarapinon kiintotilavuus (pinotiiviyys)			0.4	
Puutavaran kosteus			55.0 p-%	
Lumikerroksen paksuus			0.4 m	
Veden tiheys			1000 kg/m3	
Lumen vesi-arvo			20 %	
Veden imeytymisosuus puutavaraan			60 %	

Laskelmat osoittavat, että lumen sulamisen vaikutus tuoreen energiapuun (55 %) kosteuteen ei missään vaiheessa ole enempää kuin n. 5 prosenttiyksikköä. Alkukosteudeltaan kuiveman materiaalin (35 %) kosteus nousee suhteellisesti enemmän, suurimmillaan lähes 10 % prosenttiyksikköä. Tällöin on kuitenkin huomioitava, että lumikerroksen korkeuden on oletettu olevan 0,80 m ja kaiken siitä syntyvän veden oletetaan imeytyvän kasaan. Käytännössä lumikerros on yleensä matalampi ja kaikki sulanut vesi ei aina imeydy varastokasaan, vaan osa valuu maahan. Siten kosteuden muutokset ovat käytännössä useimmiten selvästi pienempiä kuin tässä ääriarvoilla lasketussa vaihtoehdossa eli lumen sulamisen vaikutus kosteuteen ei ole sittenkään kovin merkittävä.

#### 5.5.5 Laskenta- ja mittaustulosten vertailu

Kuvissa 14 ja 15 on esitetty laskenta- ja mittaustulokset mäntykokopuun ja latvusmassan kuivumiselle. Kokopuut olivat Kivisuolla Joutsassa metsäteiden risteyksessä ja latvusmassa Tikkakoskella Jyväskylässä hiekkakuopalla. Touko-joulukuun sadanta- ja haihdunta-arvot poikkesivat sijainnin vuoksi jonkin verran toisistaan. Sadannat ja haihdunnat on esitetty taulukossa 4. Toukokuun ja joulukuun arvot ovat toukokuun puolivälistä toukokuun loppuun ja joulukuun alusta joulukuun puoliväliin. Tikkakoskella sekä haihdunta että sadanta oli runsaampaa kuin Kivisuolla.

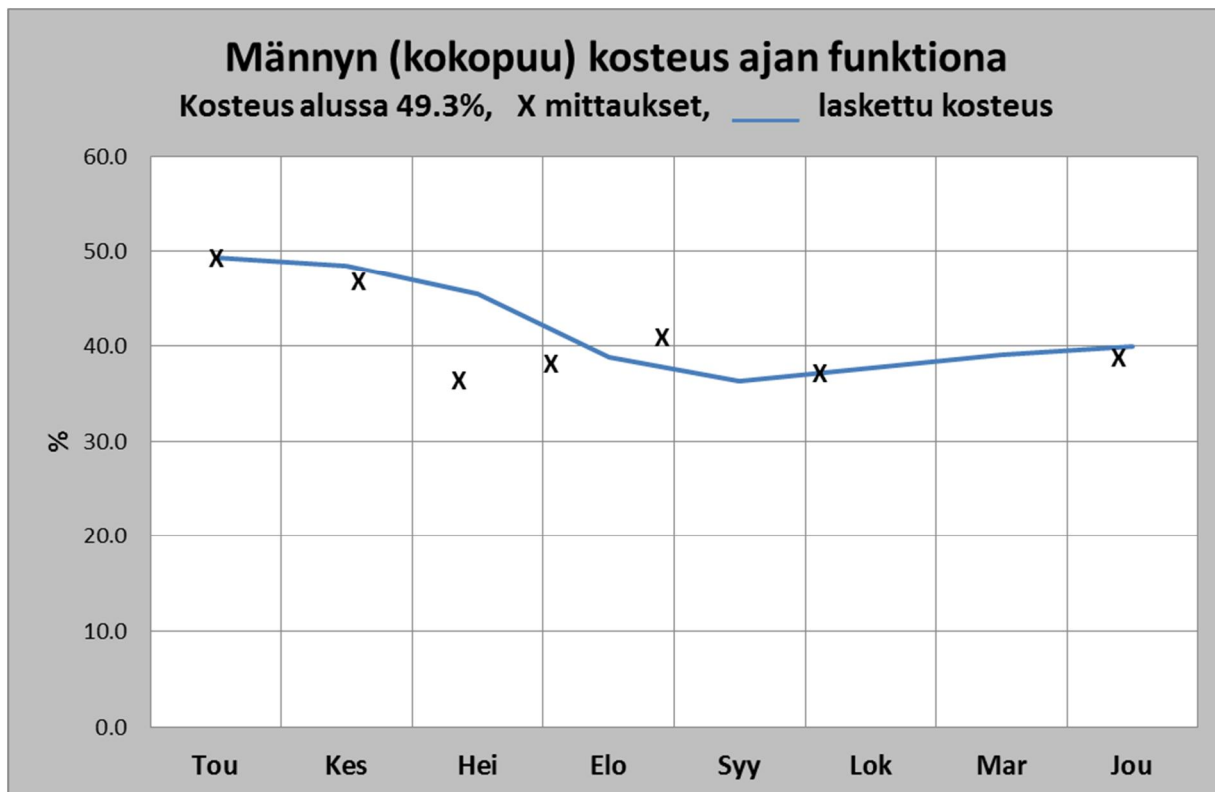
Laskennassa on käytetty kuukausittaisia, koko kuukauden sadantoja ja haihduntoja, kun taas kosteusmittaukset on tehty kuukauden eri päivinä. Laskenta- ja mittaustulokset olisivat tässä tapauksessa vertailukelpoisempia, jos mittaukset olisi tehty aina kuukauden lopussa. Esimerkiksi mäntykokopuun kuivuminen kokonaisuudessaan ja keskimäärin heinäkuussa näkyy kesä- ja heinäkuun viimeisiä päiviä vastaavien arvojen erotuksena, kun taas kolmas mittauspiste (11.7.2012) kertoo, että siihen mennessä kuivuminen on ollut paljon nopeampaa kuin keskimäärin heinäkuussa. Vielä tarkempiin tuloksiin päästäisiin, jos laskenta tehtäisiin päivätasolla. Toisaalta mikäli kuivumiskäyrä haluttaisiin laskea päivätasolla, tulisi tällöin käyttää jokaisen yksittäisen päivän sadanta- ja haihdunta-arvoja nyt käytettyjen kuukausi-arvojen sijasta. Tämä tekee laskennan melko työlääksi nyt käytetyllä laskentamenetelmällä. Lisäksi tulisi kerätä mittaustietoa sadannasta ja haihdunnasta jokaiselta päivältä, mikä sekin lisää ja vaikeuttaa työtä. Toisaalta saatava hyöty voi olla aika merkityksetön, koska käytännössä ollaan yleensä kiinnostuneita melko pitkien jaksojen aikana tapahtuvasta kuivumisesta, useiden kuukausien jaksoista. Nyt molemmissa laskentatapauksissa sekä laskenta että näytteenottoon perustuvat mittaukset ovat antaneet lähes saman tuloksen koko jakson lopussa.

On myös huomioitava, että kosteuden mittaus kasoista tarkasti on hyvin vaikeaa, varsinkin latvusmassan osalta, joka on melko epähomogeenista materiaalia. Lisäksi kun otetaan huomioon, että kuivumiseen vaikuttavat monet seikat, joita ei käytännössä voida tarkasti kuitenkaan tietää tai ottaa huomioon. Tällaisia seikkoja ovat esimerkiksi, miten kasat on tarkalleen pinottu, kasassa on halkaisijaltaan erikokoisia puita, tuulen suunta, kasan sijainti auringon säteilyn kannalta, sen alusta, jne. Mainituista syistä johtuen laskentaa ei kannata tehdä liian yksityiskohtaiseksi, koska siitä aiheutuisi paljon lisätyötä, mutta siitä ei välttämättä saataisi merkittävästi lisää hyötyä. Laskennan käytännön hyödyntäjillä, kuten polttoaineen tuottajalla tai voimalaitoksella, ei voi kuitenkaan olla käytettävissä kaikkia yksityiskohtaisia mittaustietoja jokaisesta puukasasta. Tämän vuoksi ohjelmasta on pyritty tekemään sellainen, että suhteellisen vähillä, keskeisimmillä aluetason tiedoilla (sadanta, haihdunta ja puulaji) voidaan saada kohtalaisen tarkka arvio eri kasojen kosteuksista.

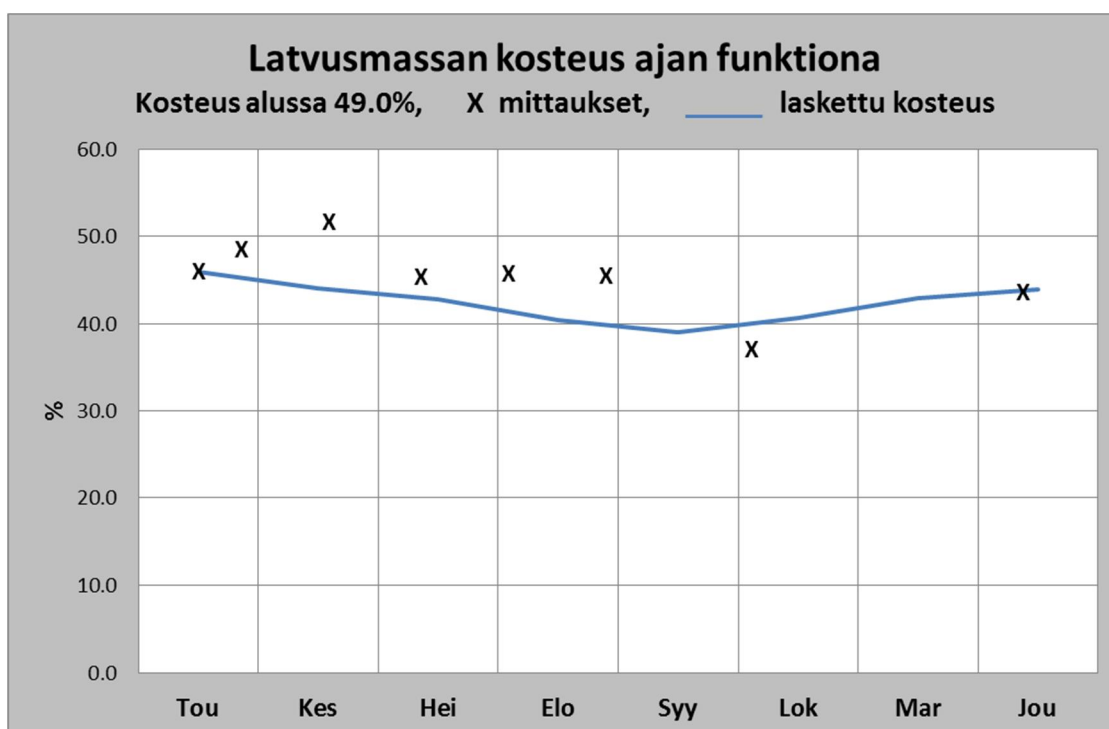
*Taulukko 4. Sadanta ja haihdunta Kivisuolla ja Tikkakoskella vuonna 2012.*

	Sadanta, mm		Haihdunta, mm	
Kuukausi	Kivisuo	Tikkakoski	Kivisuo	Tikkakoski
Toukokuu	0	50	13	70
Kesäkuu	55	92	59	83
Heinäkuu	2	47	104	88
Elokuu	28	28	60	57
Syyskuu	107	87	19	27
Lokakuu	78	94	6	9
Marraskuu	48	45	1	2
Joulukuu	0	0	0	0
Yhteensä	318	443	262	336





Kuva 14. Mäntykokopuun kosteus ajan funktiona.

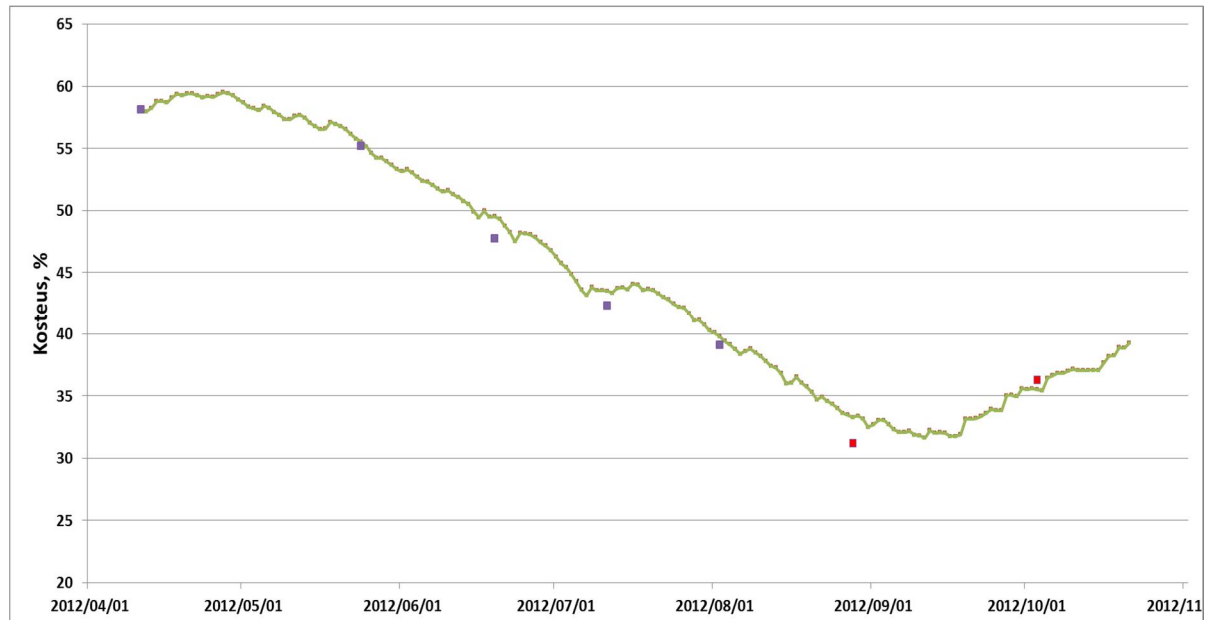


Kuva 15. Latvusmassan kosteus ajan funktiona.

Kuvassa 16 on esitetty vielä esimerkki laskennasta, jolloin on käytetty päiväkohtaisia sadannan ja haihdunnan arvoja, jotka on mitattu tunnin välein. Viittä ensimmäistä mittaustulosta on hyödynnetty käyrän parametrien ja edelleen käyrän laskennassa, kun taas kahta viimeistä mittaustulosta ei ole hyödynnetty. Esimerkillä on tarkoitus demonstroida laskennan hyödyntämistä käytännössä. On oletettu, että puun toimittaja tai muu laskennan



käyttäjä tarvitsisi ko. kasan tai sillä alueella olevia vastaavia kasoja esim. lokakuun alkupuolella. Laskennan avulla käyttäjä näkisi, että keväällä kaadettujen puiden kosteus olisi tuolloin noin 37 %. Kun käyttäjällä on käytettävissään vastaavanlaista tietoa muista muualla olevista varastokasoistaan, voi käyttäjä valita sen hetkiseen tarpeeseen parhaiten soveltuvat kasat. Laskenta antaa lähes samat tulokset kuin kaksi viimeistä mittaustulosta eli laskenta soveltuisi tässä tapauksessa erittäin hyvin kasojen kosteuden arvioimiseen ja hyödyttäisi siten käyttäjää.



Kuva 16. Mitattu ja laskettu rankapuun kosteuden muuttuminen ajan funktiona (laskennassa käytetty päiväkohtaisia sadannan ja laskennan arvoja).

## 6. Johtopäätökset

---

Kehitettyssä laskentamenetelmässä on käytetty kuukausittaisia sadantoja ja haihduntoja, mutta myös päivittäisiä arvoja voidaan käyttää kuten esimerkiksi kuvassa 16. Mikäli kuivumiskäyrä halutaan laskea päivätasolla, tulisi tällöin käyttää jokaisen yksittäisen päivän sadanta- ja haihdunta-arvoja nyt käytettyjen kuukausiarvojen sijasta. Tämä tekee laskennan melko työlääksi nyt käytetyllä laskentamenetelmällä. Lisäksi mittaustietoa sadannasta ja haihdunnasta tulisi kerätä jokaiselta päivältä, mikä sekin lisää ja vaikeuttaa työtä. Toisaalta saatava hyöty voi olla aika merkityksetön, koska käytännössä ollaan yleensä kiinnostuneita melko pitkien jaksojen aikana tapahtuvasta kuivumisesta, useiden kuukausien jaksoista. Nyt molemmissa lasketuissa esimerkkitapauksissa, joita verrattiin mittaustuloksiin, laskenta ja mittaukset ovat antaneet lähes saman tuloksen koko jakson lopussa.

Kun lisäksi otetaan huomioon kuivumiseen vaikuttavat monet seikat, joita ei käytännössä voida tarkasti kuitenkaan tietää tai ottaa huomioon, ei laskentaa kannata tehdä liian yksityiskohtaiseksi. Laskennan tarkentaminen aiheuttaisi paljon lisätyötä, mutta ei välttämättä merkittävästi lisää hyötyä. Laskennan käytännön hyödyntäjillä, esim. polttoaineen tuottajalla tai voimalaitoksella ei voi kuitenkaan olla käytettävissä kaikkia yksityiskohtaisia mittaustietoja jokaisesta puukasasta. Tämän vuoksi mallista on tehty sellainen, että suhteellisen vähillä, keskeisimmillä aluetason tiedoilla (sadanta, haihdunta ja puulaji) voidaan saada kohtalaisen tarkka arvio eri kasojen kosteuksista.

Laskentamenetelmällä tutkittiin edellä mainittujen seikkojen lisäksi kasojen peittämisen, kesän sateisuuden ja kasan päälle muodostuneen lumen sulamisen vaikutusta. Kasojen peittämisen vaikutus riippuu tietysti siitä, miten hyvin kasat on peitetty. Lasketussa esimerkissä peittämisen vaikutuksen laskennassa oletettiin, että peittäminen vähentää varastokasaan kohdistuvaa sadantaa 80 % eikä vaikuta haihduntaan. Peittämisen vaikutus kuivumiseen oli tällöin kahden vuoden jakson aikana n. 5 prosenttiyksikköä.

Sateiselle kesälle käytettiin suomalaisittain korkeita sadannan ja pieniä haihdunnan arvoja, kuivalle kesälle taas päinvastoin. Sateisena kesänä polttoaine kuivaa vain n. 6-7 prosenttiyksikköä, kun taas kuivana kesänä sen kosteus voi saavuttaa lähes tasapainokosteuden. Kesän sääolosuhteiden vaikutus on joka tapauksessa hyvin merkittävä. Sateisen tai kuivan kesän vaikutuksesta kosteus voi muuttua n. 15-20 prosenttiyksikköä normikesään verrattuna esimerkkitapauksessa käytetyillä sadantojen ja haihduntojen arvoilla.

Lumen sulamisen vaikutus laskettiin olettamalla, että kaikki kasan päälle kertynyt lumi sulaa huhtikuun aikana ja siitä tuleva vesi jakautuu tasaisesti koko kasan korkeudelle. Lumen sulamisen vaikutus kuivumiseen voi maksimissaan olla n. 10 prosenttiyksikön luokkaa, jos polttoaine on jo melko kuivaa ja lumikertymä on suuri ja siitä sulamisessa muodostuva vesi imeytyy kokonaisuudessaan puumateriaaliin.

Luonnollisesti paikalliset sääolot vaikuttavat energiapuun kuivumiseen ja laadun säilymiseen kaikkein voimakkaimmin. Seuraavaksi eniten siihen vaikuttaa varastopaikan sijainti ja ympäristö. Hyvä kuivuminen edellyttää vähäisen sateen ja riittävän haihdunnan lisäksi mahdollisimman paljon auringon säteilyä ja tuulta. Varjossa sijaitseva varastokasa voi jäädä 7-17 prosenttiyksikköä märemmäksi kuin hyvälle ja avoimelle paikalle sijoitettu auma (Hillebrand 2004). Koska varastopaikan valinta ja varaston oikea tekotapa vaikuttavat merkittävästi energiapuun kosteuden muutoksiin, tulee nämä tekijät huomioida laskentafunktioiden kertoimissa.

Laskentaa voivat hyödyntää polttoaineen tuottajat ja energialaitokset arvioidessaan, mikä on eri kasojen kosteus silloin kun niitä haluttaisiin käyttää. Esimerkiksi talvella laitoksella on usein tarve tuottaa maksimiteho kattilalla/kattiloilla. Tällöin voidaan valita käytettäväksi ne varastokasat, joiden kosteuksien on laskettu olevan pienimmät. Samoin jos laitosta täytyy esimerkiksi kesäaikaan pystyä ajamaan pienillä tehoilla, se onnistuu useimmilla laitoksilla

ainoastaan riittävän kuivalla polttoaineella, jotka voidaan määrittää olemassa olevista varastoista laskennan avulla. Laskentaa voidaan hyödyntää ylipäättään energialaitoksen polttoaineen käytön optimointiin. Polttoaineen kosteuden alentaminen parantaa yleensä kattilan hyötysuhdetta. Mallin avulla voidaan tarkastella eri vaihtoehtoja ja pyrkiä löytämään se, jolla saavutetaan koko vuoden osalta paras kokonaishyötysuhde ja käytettävyys laitoksen puupolttoaineen käytössä.

Helpoin tapa ottaa tässä hankkeessa tehty mallinnus osaksi käytännön varastohallintaa on aluksi käyttää oletuksena keskimääräisiä useiden vuosien ajalta laskettuja sadannan ja haihdunnan keskiarvoja ja laskea niiden perusteella varastojen kulloinenkin keskimääräinen kosteus. Niillä saatuja tuloksia voidaan sitten tarkentaa toteutuneilla ko. olevan vuoden arvoilla ja saada tarkempi arvio eri varastokasojen kosteuksille. Mallin käytön kannalta on olennaista tietää energiapuuvarastojen alkukosteus. Jos sitä ei voi tai haluta mitata, voi tarvittaessa käyttää apuna Tapion ja Metlan julkaisemaa virallista Energiapuun mittausopasta (Lindblad ym. 2013).

## Lähdeviitteet

---

- Garstang, J., Weekes, A., Poulter, R. & Bartlett, D. 2002. Identification and characterization of factors affecting losses in the large-scale, non-ventilated bulk storage of wood chips and development of best storage practices. First Renewables Ltd.
- Heinek, S., Mair, G., Huber, M.B., Hofmann, A., Monthaler, G., Fuchs, H.P., Larch, C., Giovannini, A. 2012. Biomass conditioning: Minimization of the storage related loss of biomass. 20<sup>th</sup> European Biomass Conference and Exhibition, 18-22 June, Milan, Italy. Conference paper.
- Hillebrand, K. (toim.). 2004. Metsähakkeen tuotannon kehittäminen nuorista metsistä. Hankekokonaisuus 2001-2004. Osaprojektien loppuraportit. Puuenergian teknologiaohjelma. Tekes. VTT Prosessit. PRO2/P6021/04.
- Hillebrand, K. 2009. Energiapuun kuivaus ja varastointi, yhteenveto aikaisemmin tehdyistä tutkimuksista. VTT, Jyväskylä. 17 s. Tutkimusraportti: VTT-R-07261-09.
- Hydrologinen vuosikirja 2006 – 2010. Korhonen, J. ja Haavanlammi, E. (toim.). Suomen ympäristö 8/2012, Luonnonvarat, 234 s. Verkkojulkaisu.
- Lepistö, T. (toim.). 2010. Laatuhaakkeen tuotanto-opas. Suomen metsäkeskus.
- Lindblad, J., Äijälä, O. & Koistinen, A. 2013. Energiapuun mittaus. Metsätalouden kehittämiskeskus Tapio ja Metsätutkimuslaitos. URN:ISBN:978-952-5694-28-4.
- Martiskainen, J. 2013. Biomassan kuiva-aine- ja kosteuspitoisuuden sekä kuiva-ainetappioiden määrittämis menetelmiä. Raportti työssä oppimisjaksolta VTT:llä osana 'Bioenergiaosaajakurssi korkeakoulutetuille' –kurssia.
- Nord Test Method. 2008. Guidelines for storing and handling of solid biofuels. Nordic Innovation Centre. Norway.
- Thörnqvist, T. & Raida, J. 1990. Bränsleflisens förändring över tiden – vid lagring i stora stackar (Changes in fuel chips during storage in large piles). Swedish University of Agricultural Sciences. Department of Forestry. Report No. 219.

## LIITE

### Puun tasapainokosteus

(Koponen, H. 1990. Puutuotteiden liimaus. Otatieto Oy. 142 s. ISBN 951-672-100-1)

